

УДК 539.3; 539.4

Р.Е.КОЧУРОВ, асп., НТУ «ХПИ»;

С.А.БЕЛОВ, канд. техн. наук, зав. лаб., ОАО «УКРНИИХИММАШ», Харьков;

К.В.АВРАМОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;

Л.В.РОЗОВА, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СОСУДА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Проведено міцнісний розрахунок горизонтального сосуда на сідлових опорах на статичні навантаження і сейсмічний вплив. Напружено-деформований стан конструкції досліджується за допомогою програмного комплексу, що реалізує метод кінцевих елементів. Для сейсмічних розрахунків застосовується лінійно-спектральна теорія сейсмостійкості.

Strength calculations of seismically excited horizontal vessels are carried out. Stress-strain state is analyzed by using software for finite elements calculations. Linear-spectral theory of seismic stability is used.

1 Введение и постановка задачи. Горизонтальные цилиндрические сосуды широко используются в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Часто такие конструкции устанавливаются в сейсмически активных районах, где есть опасность их разрушения, потери устойчивости и нарушения эксплуатационных режимов. Химические аппараты являются опасными объектами, и аварии на них могут привести к техногенным катастрофам. Поэтому данные конструкции подлежат расчетному анализу, и к ним предъявляются жесткие требования по сейсмостойкости. Отметим, что расчет горизонтальных сосудов на сейсмическое воздействие в соответствии с методиками, опирающимися на ДБН В.1.1 – 12: 2006 [1] не позволяет получить полную картину деформирования, а также учесть большое количество собственных частот конструкции.

В данной работе предлагается подход к расчету напряженно-деформированного состояния аппарата, который базируется на использовании программного комплекса, реализующего метод конечных элементов. Для сейсмических расчетов конструкций применяется линейно-спектральная теория сейсмостойкости [2, 3], которая основана на разложении системы дифференциальных уравнений колебаний по собственным формам. Согласно этому подходу, анализ сейсмостойкости включает следующие этапы: 1) по спектрам отклика вычисляются инерционные сейсмические нагрузки, соответствующие каждой из собственных мод колебаний; 2) данные нагрузки прикладываются как статиче-

ские, при этом определяются модальные отклики (перемещения, поперечные и продольные усилия, моменты) конструкции; 3) суммируя модальные отклики по формулам среднеквадратичного осреднения, вычисляется суммарный отклик, по которому оценивается сейсмостойкость конструкции.

В качестве исследуемой конструкции рассмотрим камерную печь [4], схема которой представлена на рис. 1. Печь представляет собой горизонтальный стальной цилиндрический сосуд – 1, футерованный огнеупорным кирпичом – 2. На торце аппарата установлены горелки 3. Через штуцера 4 производится ввод кислых газов. Выход дымовых газов осуществляется через штуцер 5. Аппарат установлен на седловых опорах – 6.

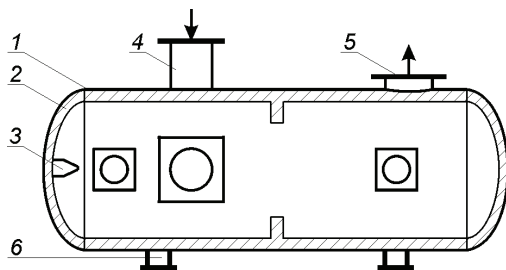


Рисунок 1– Схема печи

В расчетах использовались следующие параметры системы: длина корпуса аппарата $h = 7,6$ м; внутренний диаметр обечайки $D = 2,8$ м; толщина обечайки $S = 0,016$ м; масса аппарата в рабочем режиме – 41610 кг; внутреннее давление – 1,7 МПа; среднее значение температуры корпуса – 200 °С; материал сосуда и седловых опор – сталь 09Г2С. Высота установки конструкции – 40 м.

2 Математическая модель аппарата. Для создания расчетной модели использовались 4х-узловые конечные элементы оболочки имеющие шесть степеней свободы в узле: перемещения в направлениях осей X , Y , Z и углы поворота относительно этих осей. Геометрическая модель аппарата с конечно-элементной сеткой приведена на рис. 2. Аппарат жестко защемлен в точках основания седловых опор (см. рис. 2).

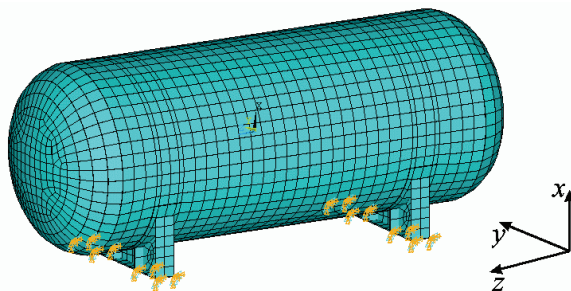


Рисунок 2 – Модель аппарата и его конечно-элементная сетка

3 Статический анализ конструкции. Ниже приведены результаты статического расчета. В рабочем режиме на сосуд действует давление газа, температурное поле, весовые нагрузки. На рис. 3, *а* представлена диаграмма суммарных перемещений аппарата. Максимальные прогибы в корпусе составляют 1.3 мм. На рис. 3, *б* представлена диаграмма распределения эквивалентных напряжений в конструкции. Максимальные напряжения возникают в области примыкания эллиптического днища к цилиндрической части и составляют 77,8 МПа.

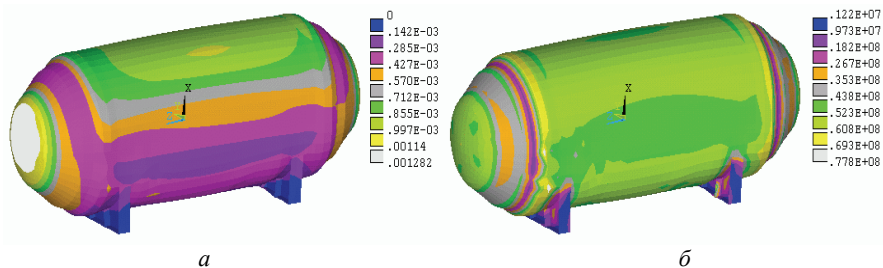


Рисунок 3 – Результаты статического расчета: *а* – диаграмма суммарных перемещений (м); *б* – диаграмма эквивалентных напряжений (Па).

4 Сейсмический анализ системы. Произведем анализ прочности аппарата при действии сейсмической нагрузки. В качестве исходных данных этой нагрузки используем обобщенные спектры отклика (рис. 4) [5]. Данный подход позволяет исследовать прочность, как корпуса аппарата, так и его сборочных единиц, а также позволяет учесть влияние составных частей аппарата (в данном случае седловых опор) на общую картину деформирования.

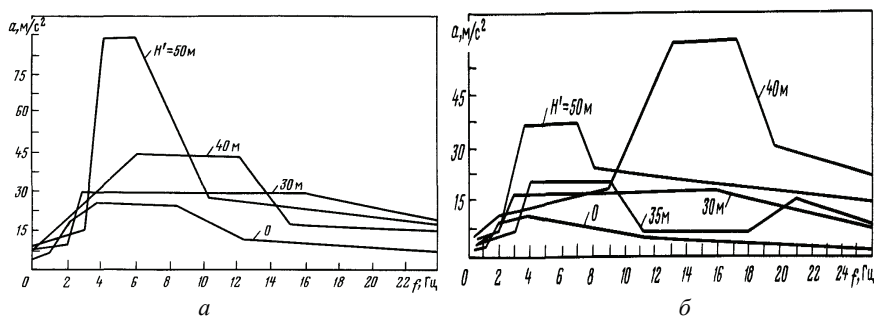


Рисунок 4 – Обобщенные спектры отклика колебаний при относительном демпфировании $K = 0,02$ и сейсмичности площадки 9 баллов:
а – горизонтальных; *б* – вертикальных.

Длина сейсмической волны по сравнению с протяженностью сооружения весьма велика. Поэтому предположим, что при ее проходе фундамент сооружения испытывает лишь некоторое поступательное перемещение вдоль координатных осей (рис. 2).

В табл. 1 приведены собственные частоты колебаний конструкции, расположенные в порядке возрастания в диапазоне от 0 до 30 Гц. Этот частотный диапазон соответствует сейсмическому нагружению.

Результаты сейсмического анализа представлены на рис. 5-7. На рис. 5 представлены диаграммы максимальных суммарных перемещений и максимальных эквивалентных напряжений от сейсмического воздействия при возмущении вдоль оси x . В этом случае наибольший вклад в деформирование сосуда вносят формы с номерами частот $i = 2, 3, 4, 6, 7$ (табл. 1). Максимальные прогибы, возникающие в корпусе аппарата, составляют 2,9 мм. Максимальные эквивалентные напряжения в корпусе аппарата составляют 31,3 МПа, напряжения на опорах – 69,3 МПа.

Таблица 1 – Собственные частоты колебаний конструкции

i	1	2	3	4	5	6	7	8
ω_i (Гц)	8,9761	15,928	16,630	19,248	20,783	24,190	24,776	28,284

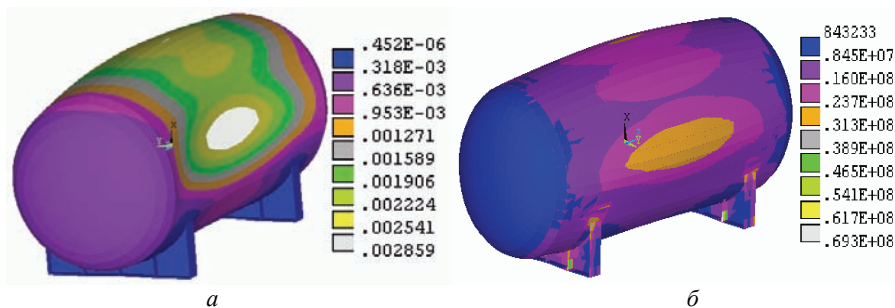


Рисунок 5 – Результаты сейсмического анализа при возмущении в направлении оси x :
 a – диаграмма суммарных перемещений (м); b – диаграмма напряжений (Па)

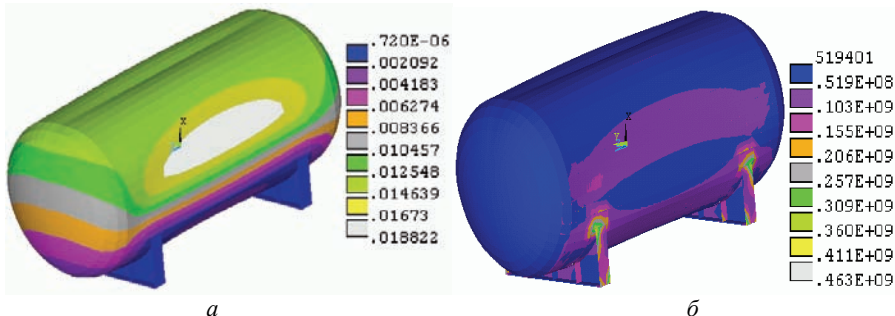


Рисунок 6 – Результаты сейсмического анализа при возмущении в направлении оси y :
 a – диаграмма суммарных перемещений (м); b – диаграмма напряжений (Па)

Рис. 5 соответствует сейсмическому возмущению конструкции вдоль оси y . При этом наибольший вклад в деформирование сосуда вносят формы с номерами частот $i = 1, 3, 5, 8$. Максимальные прогибы составляют 18,8 мм. Макси-

мальные эквивалентные напряжения в корпусе аппарата составляют 155 МПа, на опорах – 463 МПа.

Рис. 6 представляет результаты сейсмического анализа от возмущений вдоль оси z . Наибольший вклад в деформирование сосуда вносят формы с номерами частот $i = 2, 4, 6, 7$. Максимальные прогибы составляют 0,9 мм. Максимальные эквивалентные напряжения в корпусе аппарата составляют 22,5 МПа, на опорах – 101 МПа.

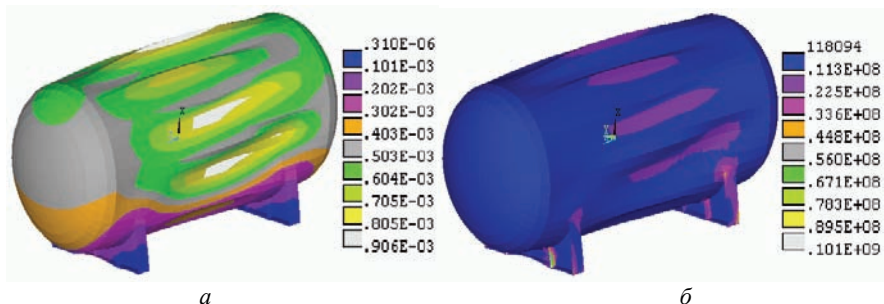


Рисунок 7 – Результаты сейсмического анализа при возмущении в направлении оси z : а – диаграмма суммарных перемещений (м); б – диаграмма напряжений (Па)

5 Оценка прочности конструкции. Результаты статического расчета (от статических нагрузок в рабочем режиме) и сейсмического анализа (от динамического воздействия при сейсмичности 9 баллов) свидетельствуют о том, что максимальные эквивалентные напряжения, возникающие в корпусе аппарата и на опорах, не превышают допустимых [6]:

$$\sigma_{max} = 463 \text{ МПа} < 3 [\sigma] = 495 \text{ МПа.}$$

Выводы. В статье представлен анализ динамической прочности печи, представляющей собой горизонтальный цилиндрический сосуд, установленный на седловых опорах, при сейсмическом воздействии. Приведенный расчет показывает, что рассматриваемая конструкция отвечает требованию сейсмостойкости при сейсмичности 9 баллов. При этом напряжения от сейсмического воздействия оказываются определяющими. Они в несколько раз превышают статические напряжения. Отметим, что для данного сосуда наиболее опасным направлением при сейсмическом возмущении является направление вдоль оси u .

Список литературы: 1. ДБН В.1.1 – 12: 2006. Будівництво у сейсмічних районах України. – Київ: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006 р. – 49 с. 2. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. – СПб.: Наука, 1998. – 255с. 3. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений: учеб. / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров, Б. Я. Лащеников, Н. Н. Шапошников. – М.: Стройиздат, 1984. – 416 с. 4. Исламов М. Ш. Печи химической промышленности / М. Ш. Исламов. – Ленинград: Химия, 1975. – 432 с. 5. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989 г. – 528 с. 6. ГОСТ Р 52857.1 – 2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2008 г. – 22 с.

Поступила в редколлегию 10.10.2010